第47卷 第12期
2024年12月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 47 No. 12
Dec. 2024

基于Meta分析的毛乌素沙地荒漠化动态研究

修晓敏[1,2]， 吴 波[1,2,3]， 费兵强[1,2]， 殷 婕[1,2]， 张令光[1,2]，
李 佳[1,2]， 庞营军[1,2]， 贾晓红[1,2]

（1. 中国林业科学研究院生态保护与修复研究所，北京 100091； 2. 荒漠生态系统与全球变化国家林业和草原局重点实验室，北京 100091； 3. 三北工程研究院，北京 100091）

摘 要： 荒漠化是全球重要的生态环境问题，毛乌素沙地是我国荒漠化防治的重点区域。过去30 a来已有许多关于毛乌素沙地荒漠化动态的研究，但是缺乏对近70 a来毛乌素沙地荒漠化动态变化趋势的系统分析。采用Meta分析方法整合39个研究案例的研究结果，系统分析1950年代以来毛乌素沙地荒漠化动态变化趋势，并对驱动因素进行了讨论。结果表明：(1) 近70 a来，毛乌素沙地轻度荒漠化面积占比呈现先减少后增加的趋势，中度荒漠化面积占比呈现略有增加的趋势，重度荒漠化面积占比呈现先增加后减少的趋势，荒漠化呈现明显的逆转趋势。(2) 1980—1989年毛乌素沙地荒漠化轻微逆转，1990—1999年荒漠化有扩展趋势，2000—2009年荒漠化发生逆转，2010—2019年荒漠化持续稳定逆转，2000年是毛乌素沙地荒漠化发生逆转的重要时间节点。(3) 连续的干旱对荒漠化扩展具有显著的促进作用，2000年以来持续的生态工程建设和"禁牧、休牧、轮牧和以草定畜"政策的实施是毛乌素沙地荒漠化持续逆转的主要原因。研究结果可以为系统认识毛乌素沙地荒漠化发展规律及制定荒漠化防治对策提供参考。

关 键 词： 荒漠化动态；Meta分析；驱动因素；生态工程；毛乌素沙地

文章编号： 1000－6060(2024)12－2051－13(2051～2063)

荒漠化是全球面临最重要的生态环境问题之一，严重制约并威胁人类生存和经济社会可持续发展。我国是世界上受荒漠化危害最严重的国家之一，每年造成的直接经济损失超过6.40×10^{11}元，将近4.00×10^{9}人口受到荒漠化影响[1]。全国荒漠化和沙化监测结果表明，截至2019年，我国荒漠化土地面积257.37×10^{4} km^2，约占国土总面积的26.81%[2]。当前，荒漠化仍是我国最严重的生态环境问题之一。受气候变化和人类活动的影响，荒漠化土地分布范围和不同荒漠化程度土地面积的占比不断发生变化。降水增加有利于植被恢复，能够促使荒漠化土地恢复，而干旱可能造成植被退化，导致荒漠化扩展。在荒漠化地区开展生态工程建设，通过围栏封育、飞播治沙、退牧还草等治理措施可以促使荒漠化土地恢复，而过度放牧、过度开垦和过度利用地下水则会造成荒漠化进一步扩展。由于荒漠化具有严重的危害性，因此需要对荒漠化进行监测和评价，以及时了解荒漠化的动态信息，为荒漠化防治决策提供依据。1990年代以来，为了全国荒漠化监测和履行《联合国防治荒漠化公约》的需要，荒漠化监测与评价研究得到学术界的广泛关注。荒漠化动态监测对土地资源管理和荒漠化防治战略的制定具有重要意义[3-5]。遥感技术能够提供多尺度、多时相、长时序的空间数据及其分析方法，为区域尺度上长期、连续的荒漠化动态监测提供了可能[6-9]，近年来遥感技术的蓬勃发展极大地推动了荒

收稿日期： 2024-02-25； **修订日期：** 2024-03-31
基金项目： 内蒙古自治区科技重大专项(2024JBGS002002)；国家重点研发计划(2023YFF1305304)；科技兴蒙行动重点专项(KJXM-EEDS-2020006)；国家自然科学基金项目(42371074)资助
作者简介： 修晓敏(1993-)，女，博士研究生，主要从事生态遥感研究. E-mail: xiuxiaomin@caf.ac.cn
通讯作者： 吴波(1968-)，男，研究员，主要从事景观生态学研究. E-mail: wubo@caf.ac.cn

漠化动态监测技术的发展。

Meta分析是一种定量的统计分析方法,能够将同一主题下的研究结果进行综合和比较,并对该主题研究的整体规律进行分析和总结。Meta分析首先需要系统全面地收集所有相关的文献,并采用统一的科学评价标准筛选出符合要求的文献,然后将筛选出文献的研究结果用统计学方法进行综合,从而得到定性或定量的综合分析结果,使得出的结论更全面、可靠[10]。Osenberg等[11]最早将Meta分析应用到生态学中,彭少麟等[12-13]将Meta分析引入到中国生态学领域。近年来,一些学者将Meta分析应用于草地生态恢复[10]、放牧对草地的影响[14-15]、生态系统服务价值评估[16]、环境污染[17-18]等研究,将Meta分析应用于荒漠化研究还未见报道。

毛乌素沙地是我国荒漠化研究的典型地区和热点地区之一[19-21]。1990年代以来,许多学者采用遥感技术围绕毛乌素沙地的荒漠化动态、景观格局及其变化开展了广泛研究[22-24],对1950年代以来毛乌素沙地近70 a的荒漠化动态进行了系统分析。但是前人的研究相互独立,研究结果存在差异,毛乌素沙地荒漠化动态变化的总体规律仍不清楚。因此本研究通过对毛乌素沙地荒漠化动态监测文献的系统整合,在时间尺度上构建毛乌素沙地荒漠化进程的Meta分析框架,对近70 a来毛乌素沙地荒漠化发展阶段进行划分,系统分析毛乌素沙地荒漠化动态变化和发展规律,并探讨不同时期气候和社会经济因素对荒漠化的影响,旨在为毛乌素沙地山水林田湖草沙系统治理和区域生态、社会、经济的可持续发展提供决策依据。

1 研究区概况

毛乌素沙地位于鄂尔多斯高原南部,地理位置介于为37°28′~39°21′N、107°23′~110°30′E之间,总面积约4×10^4 km^2。行政区划上地处内蒙古、陕西、宁夏的交界地带,包括内蒙古自治区鄂尔多斯市南部(伊金霍洛旗南部、乌审旗全部、鄂托克前旗东南部、鄂托克旗东南部)、陕西省榆林市北部(神木、榆阳、横山、靖边、定边5个市、区、县的一部分)以及宁夏回族自治区盐池县东北部。研究区地势西北高东南低,海拔介于1200~1600 m之间。该地区属于典型的温带大陆性半干旱气候,年平均气温6.0~8.5 ℃;多年平均降水量约250~440 mm,其中60%~80%集中在7—9月,并且从东南部向西北部递减;年蒸发量1800~2500 mm;以西北风为主,年平均风速为2.1~3.3 m·s^{-1},尤以3—5月风速最大。毛乌素沙地以固定沙丘、半固定沙丘和流动沙丘镶嵌在一起的地表景观为特色,土壤类型主要为风沙土,地表物质疏松,沙源物质丰富,风沙活动强烈。植被以沙生植被为主,油蒿(*Artemisia ordosica*)、柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)、沙地柏(*Sabina vulgaris*)和沙柳(*Salix cheilophila*)等是沙地上最主要的建群植物。

2 材料与方法

2.1 数据收集

通过CNKI(China National Knowledge Infrastructure)和WOS(Web of Science)数据库,以毛乌素沙地、沙漠化、沙化、荒漠化、Mu Us(sandyland、desertification、landscape)、Maowusu(sandyland、desertification、landscape)等为关键词进行文献检索,检索文献类型包括期刊论文、学位论文和会议论文,共计检索到2836篇文献,其中通过CNKI检索得到1262篇,通过WOS检索得到1574篇。

按照PRISMA(Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses)系统评价和Meta分析首选报告项目细则[25]对文献进行筛选。筛选标准如下:(1)研究区域为毛乌素沙地;(2)研究内容需包含荒漠化遥感监测或荒漠化遥感评价;(3)文献需提供荒漠化遥感监测或评价数据。最终共筛选出39篇文献[6,26-63]用于分析(图1)。

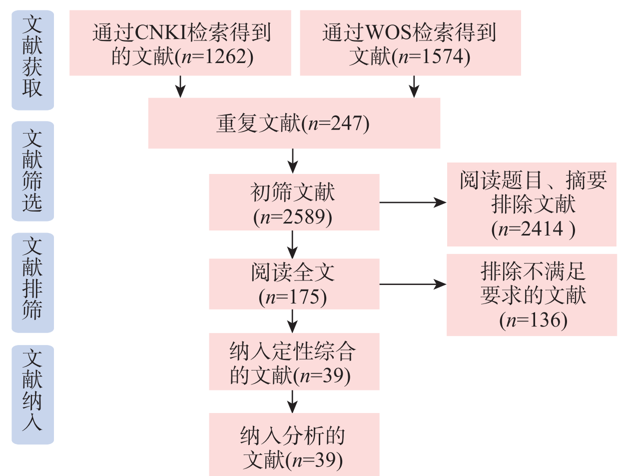


图1 PRISMA流程图

Fig. 1 Flow of preferred reporting items for systematic reviews and Meta-analyses

本研究通过国家气象科学数据中心(http://www.nmic.cn/)收集到毛乌素沙地7个气象站(鄂托克前旗、榆林、神木、盐池、定边、靖边和横山)的气候数据，获得1980—2019年降水、气温和风速数据。此外，通过《内蒙古统计年鉴》《鄂尔多斯统计年鉴》《鄂托克旗志》和《榆林统计年鉴》收集社会经济数据。

2.2 数据库构建

对39篇文献的基本信息(题目、作者等)、研究区信息、时段、方法和结果等进行数据提取。数据直接从文献全文及表格中提取，对于以图片形式展示的数据利用PlotDigitizer(Version 2.6.9)软件进行提取。提取后将信息和数据进行整理并录入Excel建立Meta分析数据库。39篇文献视为39个研究案例，不同研究案例中使用的毛乌素沙地荒漠化分类体系和评价指标与标准不完全一致，有的分为固定沙地、半固定沙地和流动沙地，以此代表不同荒漠化程度；有的将荒漠化程度划分为3级，即轻度、中度和重度荒漠化；有的划分为4级，即除轻度和中度荒漠化外，将重度荒漠化进一步划分为重度和极重度荒漠化。采用的评价指标主要为植被指数(如NDVI)或植被覆盖度。经过分析发现，虽然荒漠化分类体系与标准不完全一致，但是研究结果所反映的荒漠化动态变化规律和趋势是一致的。参照《全国荒漠化和沙化监测技术规定》[64]中土地沙化分类系统和荒漠化程度评价体系，本研究将原始数据重新归类，将研究区土地荒漠化程度划分为3级，即轻度、中度和重度荒漠化，固定、半固定和流动沙地分别归为轻度、中度和重度荒漠化，将重度和极重度荒漠化合并为重度荒漠化。

2.3 荒漠化监测时段划分

根据收集到的研究案例，研究时段最早可以追溯到1950年代末期。在所收集的研究案例中，对毛乌素沙地进行1~3 a监测的研究案例有8个，5~10 a监测的研究案例有5个，10~20 a监测的研究案例有12个，20~30 a监测的研究案例有10个，30~40 a监测的研究案例有2个，监测时段超过40 a的研究案例有2个(图2)。荒漠化过程是在时间上不断发展的现象，在10 a、20 a或更长时间尺度下的演变规律会有所差异[65]。为了客观反映近70 a来不同时段毛乌素沙地荒漠化动态变化规律，本研究基于研究案例的监测时段，采用4种监测时段长度对毛乌素沙地荒漠化动态监测时段进行划分，分别为10 a、20 a、30 a和40 a。

2.4 分析方法

2.4.1 荒漠化面积数据整理 研究案例中大部分是以整个毛乌素沙地为研究区，但不同研究案例之间毛乌素沙地范围存在一定差异。还有部分研究案例以毛乌素沙地的一部分区域为研究区，如柏菊等[34]以鄂尔多斯市南部、榆林市北部和盐池县东部为研究范围；Guo等[63]以整个鄂尔多斯高原为研究区进行研究。为保证研究区不同研究案例之间荒漠化动态监测数据具有可比性，统一将不同荒漠化程度的面积数据换算为面积百分比数据。

2.4.2 荒漠化面积变化度量指标 为了分析不同程度荒漠化面积的变化特征，本研究借鉴土地利用动态度的概念。土地利用动态度指研究区在一定时间范围内某种土地利用类型的变化速度，即该土地利用类型在此研究时段内的年均变化率[66-67]。这里定义K为荒漠化面积百分比动态度：

$$K = \frac{U_b - U_a}{U_a} \times \frac{1}{T} \times 100\% \tag{1}$$

式中：U_a和U_b分别为研究时段初期和末期某荒漠化程度的面积百分比(%)；T为研究时段长度(a)。

本研究使用年均面积百分比变化量和动态度(K)2个指标来描述不同荒漠化程度的面积变化特征。

2.4.3 Meta分析 效应值是Meta分析的核心指标，它是一系列度量效应程度大小指标的统称[68]。效应值的选择是由研究数据类型决定的，一般连续型变量选择加权均数差或标准化均数差为效应值，分类变量选择比值比或相对比率(Relative rate/risk ratio，RR)为效应值。荒漠化程度属于分类变量，本研究选择RR作为效应值度量指标，定量评估毛乌素沙地不同荒漠化程度的面积变化。计算公式如下：

$$\mathrm{RR} = \frac{p_2}{p_1} \tag{2}$$

$$\mathrm{SE_{RR}} = \sqrt{V_{\mathrm{RR}}} \tag{3}$$

$$\mathrm{CI_{RR}} = \mathrm{RR} \pm 1.96 \times \mathrm{SE_{RR}} \tag{4}$$

式中：RR为研究时段末期某荒漠化程度面积百分比相对于研究时段初期的变化比率；p_1和p_2分别为研究时段初期和末期某荒漠化程度的面积百分比(%)；$\mathrm{SE_{RR}}$为标准误差；V_{RR}为近似方差；$\mathrm{CI_{RR}}$为RR的95%

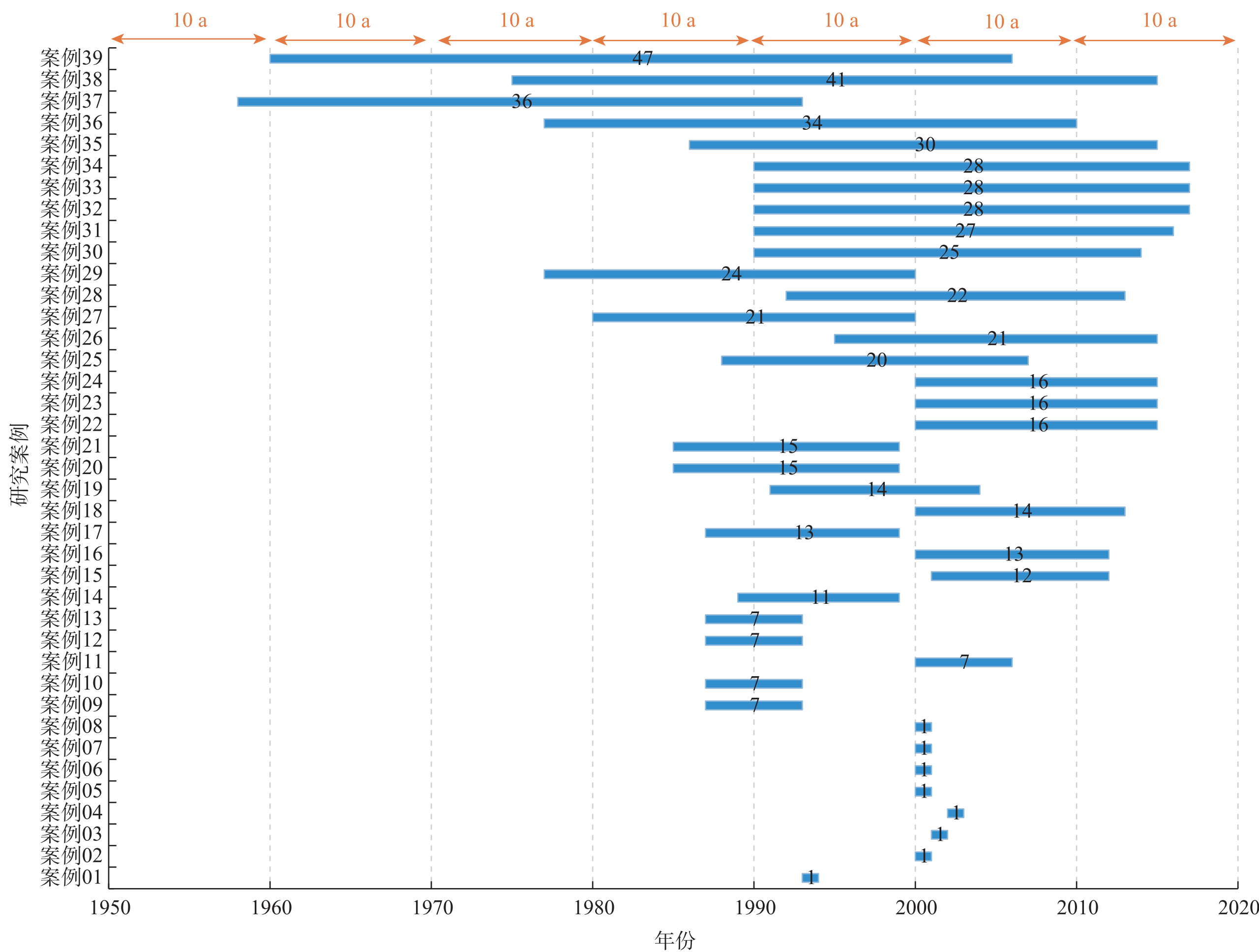


图2 39个研究案例的研究时段

Fig. 2 Period of 39 case studies

置信区间。

假设每一个研究案例的效应值是不同的，它表示所收集的研究案例来自于更大样本量研究案例的随机取样，以研究案例内部和研究案例之间变异之和的倒数赋予各研究案例相应的权重。本研究选择随机效应模型进行Meta分析，随机效应模型定义为：

$$\widehat{\theta}_j=\theta_j+\varepsilon_j=\theta+\mu_j+\varepsilon_j \tag{5}$$

式中：$\widehat{\theta}_j$ 为每个研究案例的效应值；θ_j 为真实效应值；θ 为总体效应值的均值；μ_j 为研究内部的变异，$\mu_j \sim N\left(0,\tau^2\right)$；$\varepsilon_j$ 为研究间的变异，$\varepsilon_j \sim N\left(0,\hat{\sigma}_j^{\,2}\right)$；$\tau^2$ 和 $\hat{\sigma}_j^{\,2}$ 为异质性参数。

随机效应模型中赋予的权重计算如下：

$$w_j=\frac{1}{\hat{\sigma}_j^{\,2}+\tau^2} \tag{6}$$

式中：w_j 为每个研究案例的权重。

加权后的合并效应值(RR_{++})定义为：

$$RR_{++}=\frac{\sum_{j=1}^{n}w_j\widehat{\theta}_j}{\sum_{j=1}^{n}w_j} \tag{7}$$

当加权 RR_{++} 的95%置信区间与横坐标“1”没有重叠时，代表该荒漠化程度的面积有显著变化(P<0.05)，具有统计学意义；当 RR_{++} >1时认为该荒漠化程度的面积占比增加，当 RR_{++} <1时认为该荒漠化程度的面积占比减少。

在Meta分析过程中，为保证相同长度监测时段之间数据的可比性，当一个监测时段内某研究案例的荒漠化动态监测数据只覆盖某一时间段时，采用该时段年均变化速率换算该研究案例在此监测时段的荒漠化动态监测数据。如韩雪莹[44]的研究案例中有2010年和2017年的毛乌素沙地荒漠化监测结果数据，采用2010—2017年不同荒漠化程度的年均

面积占比变化速率换算为该研究案例2010—2019年不同荒漠化程度的面积占比数据。

3 结果与分析

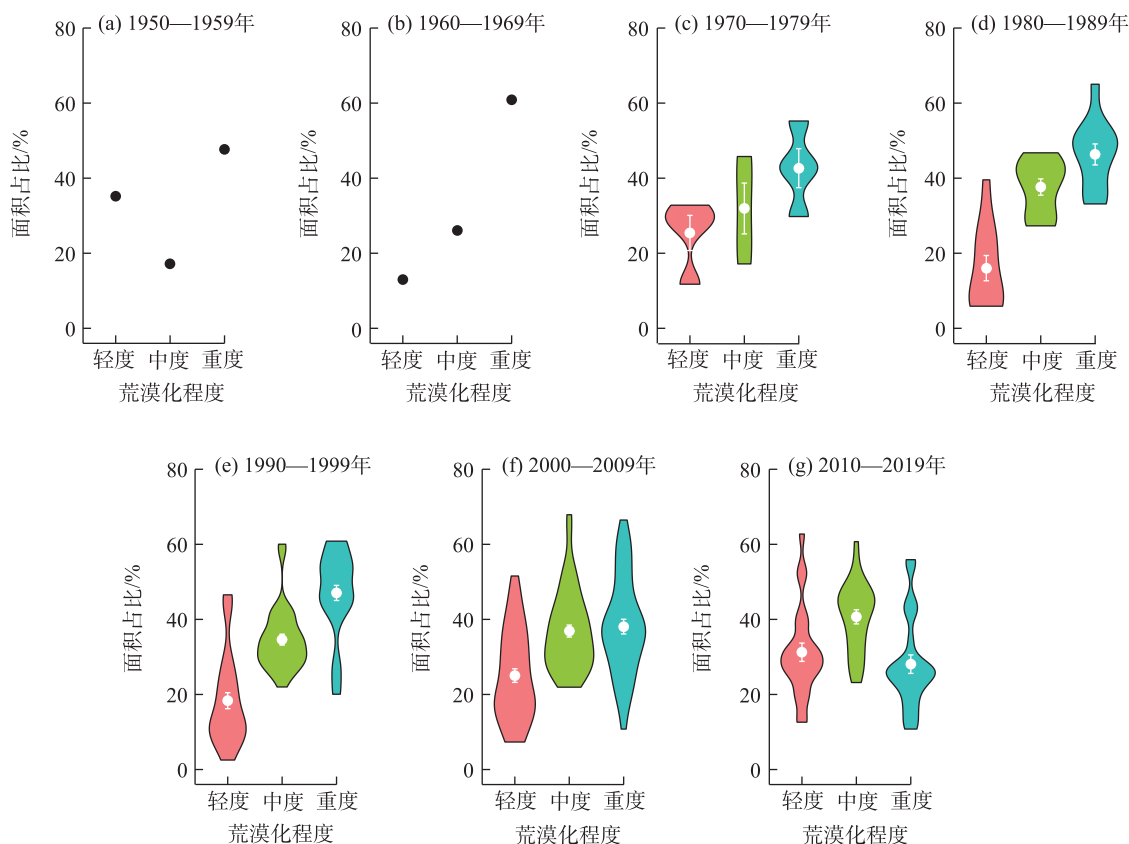
3.1 不同荒漠化程度面积变化

从39个研究案例中提取毛乌素沙地荒漠化动态监测数据，10 a长度监测时段的研究案例不同荒漠化程度的面积百分比分布如图3所示（1950—1959年和1960—1969年2个时段分别仅有1个和2个研究案例，因此以点的形式展示）。总体上看，1950—2019年毛乌素沙地轻度荒漠化面积百分比呈现先减少后增加的趋势；中度荒漠化面积百分比变化比较平稳，有轻微增加趋势；重度荒漠化面积百分比呈现先增加后减少的趋势。1950—2019年总体上毛乌素沙地荒漠化呈现逆转趋势。

总体上看，1980—2019年毛乌素沙地轻度荒漠化面积年均变化呈现"增-减-增"的变化趋势，中度和重度荒漠化面积年均变化呈现"减-增-减"的变化趋势（图4a）。从荒漠化面积年均变化和动态度2个指标综合来看，1980—1989年轻度荒漠化面积增加，中度和重度荒漠化面积略有减少，表明这一时段荒漠化有轻微逆转；1990—1999年轻度和中度荒漠化面积减少，而重度荒漠化面积增加，表明毛乌素沙地荒漠化加剧，荒漠化处于扩展状态；2000—2009年轻度和中度荒漠化面积大幅度增加，而重度荒漠化面积大幅度减少，表明荒漠化处于逆转状态，荒漠化扩展势头得到遏制；2010—2019年轻度荒漠化面积继续增加，中度和重度荒漠化面积继续减少，表明荒漠化处于持续逆转状态（图4）。

3.2 不同荒漠化程度面积相对比率变化

不同时段荒漠化面积变化差异明显（图5，1950—1959年仅有1个研究案例，无法计算效应值）。在图5a中，1990—1999年中度荒漠化面积显著减少11%（$P<0.001$）；2000—2009年轻度荒漠化面积显著增加37%（$P<0.001$），中度荒漠化面积显著增



注：提琴图的上、下边界分别表示面积百分比的最大值、最小值；白色圆点表示面积百分比的平均值；外部轮廓表示样本密度分布情况。图a~b数据较少，仅显示平均值。

图3 1950—2019年毛乌素沙地荒漠化面积占比

Fig. 3 Proportion of desertification area in the Mu Us Sandy Land from 1950 to 2019

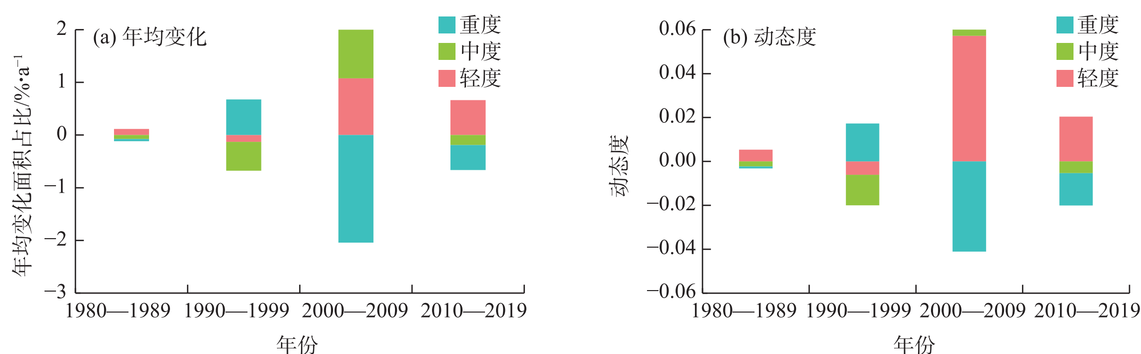
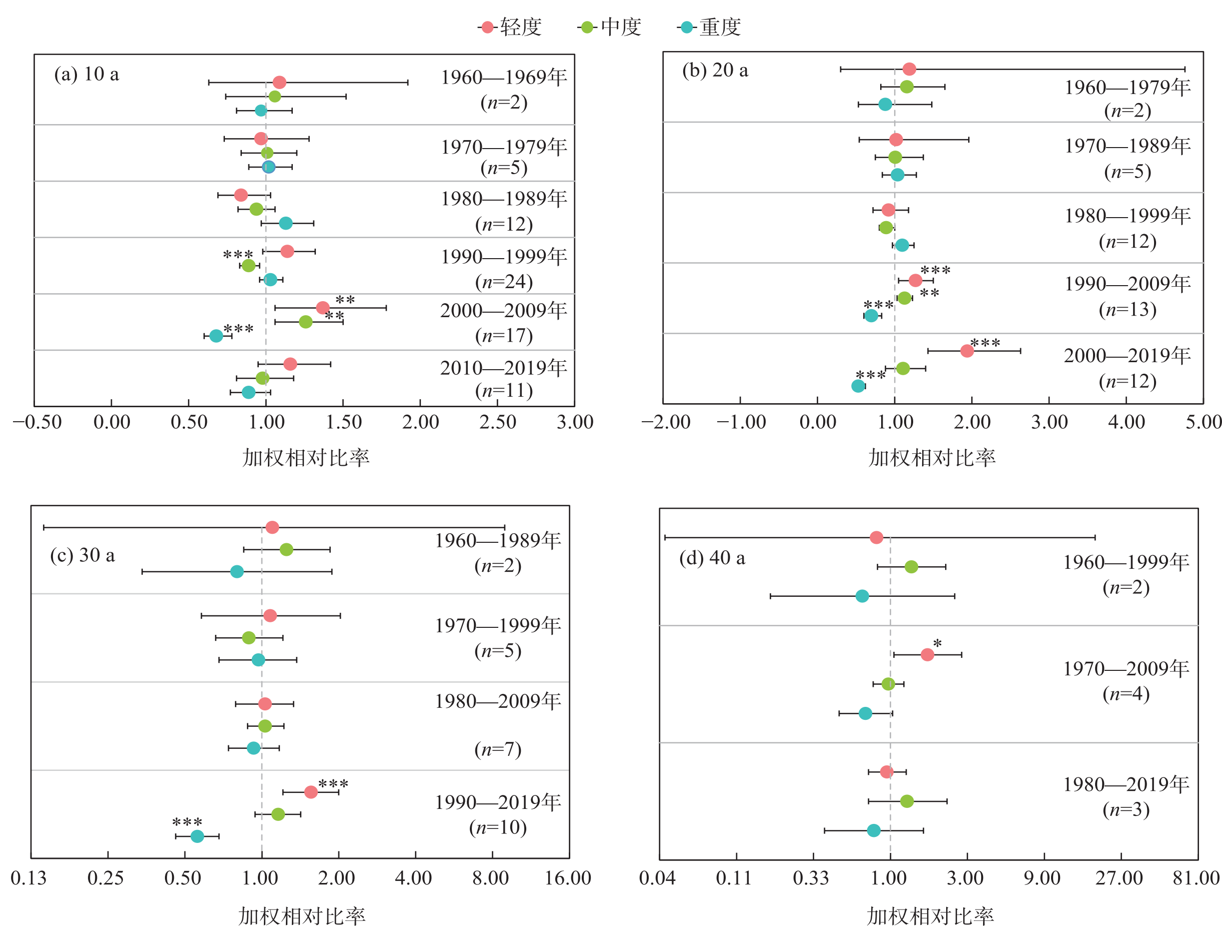


图4 1980—2019年毛乌素沙地荒漠化程度的面积变化

Fig. 4 Area change of desertification degree in the Mu Us Sandy Land from 1980 to 2019



注：线形表示加权相对比率和95%的置信区间；n为研究案例数量；显著性等级划分：***代表P<0.001，**代表P<0.01，*代表P<0.05；虚线代表无效线。

图5 不同监测时段长度下毛乌素沙地荒漠化程度的面积变化效应值

Fig. 5 Effect size with 95% CIs of desertification degree area changes in the Mu Us Sandy Land under the different monitoring periods

加26%（$P<0.001$），重度荒漠化面积显著减少32%（$P<0.001$）。在图5b中，轻度荒漠化面积在1990—2009年和2000—2019年2个时段分别显著增加27%和94%（$P<0.001$），而重度荒漠化面积在这2个时段分别显著减少30%和47%（$P<0.001$），中度荒漠化面积在1990—2009年显著增加13%（$P<0.01$）。在图5c中，1990—2019年轻度荒漠化面积显著增加56%，重度荒漠化面积显著减少44%（$P<0.001$）。在

图5d中，1970—2009年轻度荒漠化面积显著增加70%(P<0.05)。

在1990—2019年间，毛乌素沙地荒漠化面积相对比率在10 a、20 a和30 a 3个监测时段长度均有显著变化(P<0.01)。在2000—2009年、1990—2009年、2000—2019年和1990—2019年，轻度荒漠化面积显著增加、重度荒漠化面积显著减少(P<0.01)，但是在1990—1999年轻度和重度荒漠化面积变化均不显著(P>0.05)。这些结果充分说明，进入21世纪毛乌素沙地荒漠化出现逆转，2000年是荒漠化发生逆转的重要时间节点。

4 讨论

4.1 荒漠化动态变化趋势分析

通过对不同时期研究案例的整理，发现各研究案例的关注区域、研究时段和研究方法存在差异。例如，吴波[31]、王涛等[32]、闫峰等[6]将整个毛乌素沙地作为研究区(面积约为3.47×10^4~4.83×10^4 km^2)；李晓松等[36]选择毛乌素沙地北部为研究区(面积约为3.44×10^3 km^2)；李超[43]以毛乌素沙地腹地为研究区(面积约1.06×10^4 km^2)。受上述多种因素的影响，关于毛乌素沙地荒漠化进程的研究结果不尽相同。吴薇[58]认为1987—1993年毛乌素沙地处于沙漠化逆转过程；Liu等[53]的研究结果表明，1986—1995年毛乌素沙地荒漠化加剧，到2005年荒漠化出现逆转；韩雪莹等[38]指出，1990—2017年毛乌素沙地总体处于逆转趋势。针对研究结果的差异性，有必要整合不同时期、不同研究者的研究结果，系统分析毛乌素沙地荒漠化动态变化的总体规律。本研究整合39个研究案例发现，1950—2019年毛乌素沙地轻度荒漠化面积占比呈现先减少后增加的趋势，中度荒漠化面积占比呈现轻微增加的趋势，而重度荒漠化面积占比呈现先增加后减少的趋势(图4)，毛乌素沙地荒漠化呈现先扩展后逆转的趋势，研究结果与前人研究的毛乌素沙地荒漠化进程的总体趋势是一致的[69-70]。

考虑到研究方法、数据等差异引起的多样性结果，本研究选取随机效应模型运用到Meta分析中，以减小方法学差异带来的影响，并划分10 a、20 a、30 a和40 a 4个监测时段长度进行Meta分析，研究结果表明，进入21世纪毛乌素沙地荒漠化出现逆转，2000年是毛乌素沙地荒漠化发生逆转的重要时间节点(图5)。第三次全国荒漠化和沙化监测结果显示，与1999年相比，2004年全国荒漠化土地面积减少37924 km^2。此后第四次、第五次和第六次全国荒漠化和沙化监测结果显示，我国荒漠化土地面积持续减少。2000年以来，特别是党的十八大以来，我国的防沙治沙工作取得了巨大成就，荒漠化和沙化状况持续好转，沙区生态状况呈现“整体好转、改善加速”，荒漠生态系统呈现“功能增强、稳中向好”的态势。因此，2000年以来毛乌素沙地荒漠化出现明显和持续逆转，这与我国荒漠化整体的变化规律是一致的。

4.2 荒漠化驱动因素分析

毛乌素沙地荒漠化扩展和逆转受到气候因素和社会经济因素的影响。毛乌素沙地位于半干旱区，荒漠化的发生与降水、气温和风速等气候因素密切相关。图6分时间段来看，1980—1989年，年降水量有增加趋势，年均气温存在波动，年均风速有降低趋势，气候条件较有利于荒漠化逆转；1990—1999年，年降水量有减少趋势，年均气温有明显升高趋势，年均风速略有波动，气候条件较有利于荒漠化扩展，特别是1999年和2000年毛乌素沙地出现连续2 a的严重干旱，年降水量显著低于平均水平，使得沙地植被生物量显著降低，对荒漠化扩展具有显著的促进作用[55]；2000—2019年，年降水量有明显增加趋势，年均气温有波动但变化趋势不明显，年均风速略有波动，气候条件有利于荒漠化逆转。1980年以来，毛乌素沙地降水和气温的变化趋势与荒漠化变化趋势是一致的，风速的变化趋势与荒漠化变化趋势并未呈现显著相关关系。总体来看，连续的干旱加剧荒漠化扩展，年降水量增加促进荒漠化逆转。

1960年代和1970年代毛乌素沙地过度放牧严重，1980年代初期，内蒙古自治区开始实施畜草双承包责任制，激发了牧民保护草地的积极性，山羊养殖数量减少，过度放牧得到一定程度的缓解，草地压力减轻，1980—1989年降水增加，有利于荒漠化实现轻微逆转。1990年代人口持续增多(图7)，社会经济的发展使得牧区牲畜数量增加，鄂尔多斯市第一产业就业人口高达59.95%以上，当时畜牧业经营方式相对粗犷，严重的超载放牧降低了草场质量，使得草地易受风蚀侵害[61,71]。同时，1990年代出

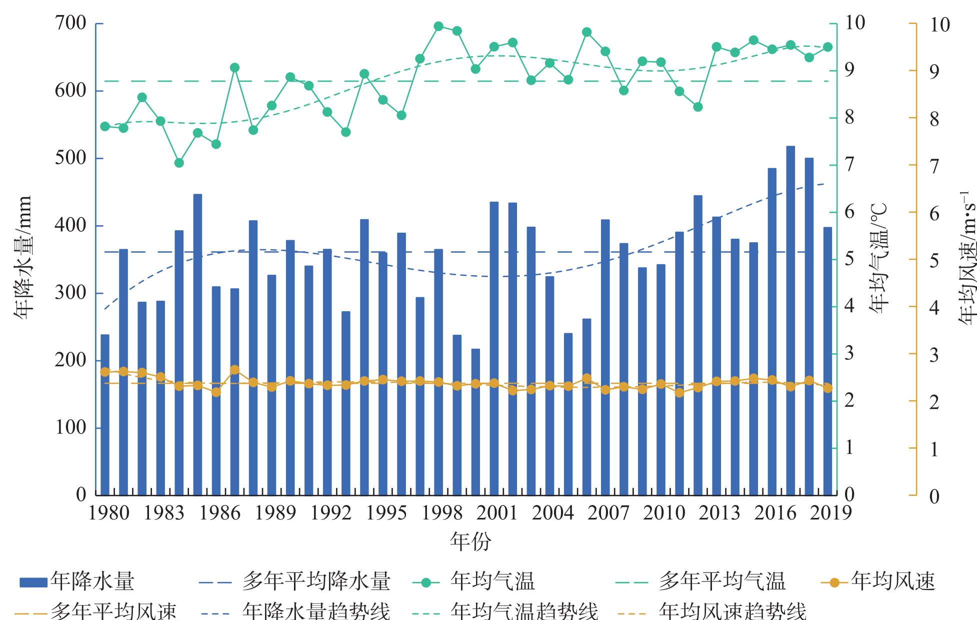


图6 1980—2019年毛乌素沙地年降水量、年均气温和年均风速变化

Fig. 6 Change of annual precipitation, annual average temperature, and annual average wind speed in the Mu Us Sandy Land from 1980 to 2019

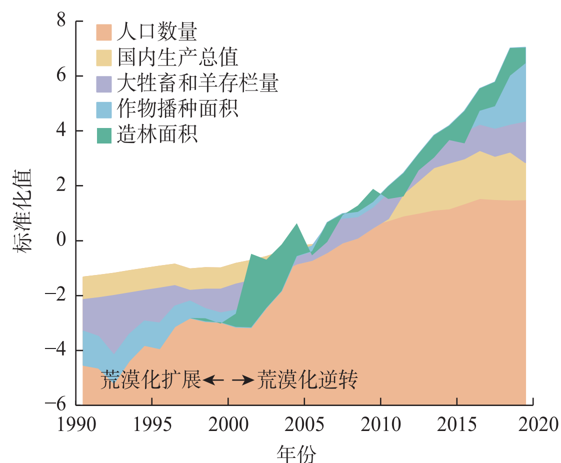


图7 1990—2019年乌审旗、鄂托克旗、鄂托克前旗和榆阳区社会经济数据趋势

Fig. 7 Trends of socio-economic data in Uxin Banner, Otog Banner, Otog Front Banner, and Yuyang District from 1990 to 2019

现了几次比较严重的干旱，人口数量的增加、落后的生产经营模式以及严重的干旱对荒漠化扩展具有显著促进作用。此外，耕地面积持续扩大，土地利用结构的改变也对1990年代荒漠化扩展具有促进作用。2000年以来人口数量、牲畜数量和耕地面积不断增加，但并没有加重研究区的荒漠化，反而研究区荒漠化逐渐逆转。荒漠化的逆转与经济产业结构优化、国家实施的政策和生态工程等密不可分。1990—2019年乌审旗、鄂托克旗、鄂托克前旗和榆阳区GDP分别增长了226.72、179.09、207.22倍和330.53倍。经济蓬勃发展的同时，产业结构也发生了改变，由1990年代农牧业为主导转向第二、三产业为主导，乌审旗和鄂托克前旗1990年代初第一产业占比超过50%，2019年第一产业占比低于10%。虽然牲畜数量大幅增加，但是国家实施了“禁牧、休牧、轮牧和以草定畜”政策，传统的畜牧业生产方式向集约化转型，牧区实现了舍饲和半舍饲的养殖模式，并且政府给予牧民禁牧补助，鼓励牧民间开展合作可持续管理牧场[72]，草地的保护有利于荒漠化逆转。近年来农牧民大力发展节水灌溉、机械化的耕作方式，这不仅增加了农业产量和收入，还有助于保持水土、恢复植被。天然林保护、京津风沙源治理、退耕还林等工程的相继实施也对毛乌素沙地2000年以来荒漠化逆转发挥了关键作用。2000—2004年毛乌素沙地造林任务实施面积大，乌审旗、鄂托克旗、鄂托克前旗和榆阳区累计造林面积超过4.53×10^5 hm^2，2005—2009年每年造林面积虽有所减少，但是2010—2019年保持了造林面积增长的持续性(图8)。据统计，三北防护林、退耕还林、天然林保护和京津风沙源治理等生态工程自2000年至2019年在鄂尔多斯市实施面积累计达到16.26×10^5 hm^2，不仅提高了植被覆盖率[73]，而且明显提升

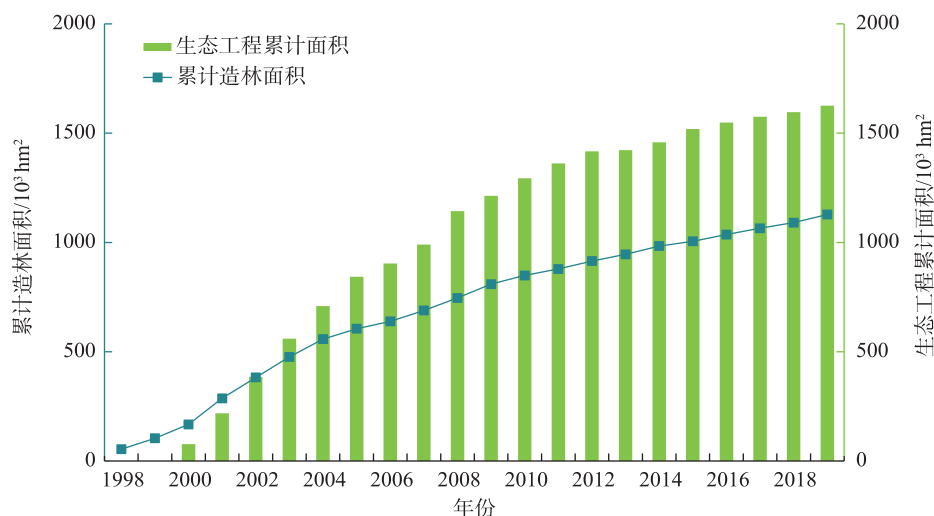


图8　1998—2019年乌审旗、鄂托克旗、鄂托克前旗和榆阳区累计造林面积及鄂尔多斯市生态工程累计面积

Fig. 8　Cumlative afforestation area of Uxin Banner, Otog Banner, Otog Front Banner, and Yuyang District, and cumlative area of ecological projects in Ordos City from 1998 to 2019

了区域防风固沙的能力，这对荒漠化土地的修复起到了显著促进作用。

4.3　存在问题

本研究通过Meta分析量化荒漠化进程，揭示了毛乌素沙地近70 a来荒漠化动态变化的总体规律，但是本研究还存在一些不足之处。首先，与其他许多Meta分析研究一样，本研究受到灰色文献以及文献检索策略的影响，文献数据不完整是难以避免的。此外，研究中有的监测时段受到研究案例数量较少的限制，可能影响结果的准确性。未来将完善检索策略，尽可能多地收集文献，丰富样本数据，提高研究结果的可靠性。

5　结　论

（1）近70 a来，毛乌素沙地轻度荒漠化面积占比呈现先减少后增加的趋势，中度荒漠化面积占比呈现略有增加的趋势，重度荒漠化面积占比呈现先增加后减少的趋势，荒漠化呈现明显的逆转趋势。

（2）1980—1989年毛乌素沙地荒漠化轻微逆转，1990—1999年荒漠化有扩展趋势，2000—2009年荒漠化扩展势头得到遏制，荒漠化发生逆转，2010—2019年荒漠化持续稳定逆转，2000年是毛乌素沙地荒漠化发生逆转的重要时间节点。

（3）毛乌素沙地荒漠化动态变化受气候因素和社会经济因素的共同影响。从近70 a来毛乌素沙地荒漠化发展过程来看，社会经济因素是荒漠化动态变化的主要驱动因素，气候因素具有一定的促进作用。连续的干旱对荒漠化扩展具有显著的促进作用，2000年以来持续的生态工程建设以及利好政策的实施是推动毛乌素沙地荒漠化持续逆转的重要原因。

参考文献（References）

[1] 卢琦, 吴波. 中国荒漠化灾害评估及其经济价值核算[J]. 中国人口·资源与环境, 2002, 12(2): 31–35. [Lu Qi, Wu Bo. Disaster assessment and economic loss budget of desertification in China[J]. China Population, Resources and Environment, 2002, 12(2): 31–35.]

[2] 昝国盛, 王翠萍, 李锋, 等. 第六次全国荒漠化和沙化调查主要结果及分析[J]. 林业资源管理, 2023(1): 1–7. [Zan Guosheng, Wang Cuiping, Li Feng, et al. Key data results and trend analysis of the sixth national survey on desertification and sandification[J]. Forest and Grassland Resources Research, 2023(1): 1–7.]

[3] Chen S S, Ren H Z, Liu R Y, et al. Mapping sandy land using the new sand differential emissivity index from thermal infrared emissivity data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2021, 59(7): 5464–5478.

[4] Wu B, Ci L J. Landscape change and desertification development in the Mu Us Sandland, northern China[J]. Journal of Arid Environments, 2002, 50(3): 429–444.

[5] Zhou D J, Zhao X, Hu H F, et al. Long-term vegetation changes in the four mega-sandy lands in Inner Mongolia, China[J]. Landscape Ecology, 2015, 30(9): 1613–1626.

[6] 闫峰, 吴波. 近40 a毛乌素沙地荒漠化过程研究[J]. 干旱区地理, 2013, 36(6): 987–996. [Yan Feng, Wu Bo. Desertification prog-

ress in Mu Us Sandy Land over the past 40 years[J]. Arid Land Geography, 2013, 36(6): 987-996.]

[7] 边振, 张克斌. 我国荒漠化评价研究综述[J]. 中国水土保持科学, 2010, 8(1): 105-112. [Bian Zhen, Zhang Kebin. Review of the research on desertification assessment in China[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2010, 8(1): 105-112.]

[8] Liang P, Yang X P. Landscape spatial patterns in the Maowusu (Mu Us) Sandy Land, northern China and their impact factors[J]. Catena, 2016, 145: 321-333.

[9] Xu Z W, Hu R, Wang K X, et al. Recent greening (1981—2013) in the Mu Us dune field, north-central China, and its potential causes[J]. Land Degradation and Development, 2018, 29(5): 1509-1520.

[10] 蒋翔, 马建霞. 我国草地生态恢复对不同因素响应的Meta分析[J]. 草业学报, 2021, 30(2): 14-31. [Jiang Xiang, Ma Jianxia. The impact of different factors on the outcomes of grassland ecological restoration to in China: A Meta-analysis[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2021, 30(2): 14-31.]

[11] Osenberg C W, Sarnelle O, Cooper S D, et al. Resolving ecological questions through Meta-analysis: Goals, metrics, and models[J]. Ecology, 1999, 80(4): 1105-1117.

[12] 彭少麟, 郑凤英. Meta分析: 综述中的一次大革命[J]. 生态学杂志, 1999, 18(6): 65-70. [Peng Shaolin, Zheng Fengying. Meta-analysis: A great revolution in review[J]. Chinese Journal of Ecology, 1999, 18(6): 65-70.]

[13] 彭少麟, 唐小焱. Meta分析及其在生态学上的应用[J]. 生态学杂志, 1998, 17(5): 74-79. [Peng Shaolin, Tang Xiaoyan. Meta-analysis and its application in ecology[J]. Chinese Journal of Ecology, 1998, 17(5): 74-79.]

[14] 詹天宇, 孙建, 张振超, 等. 基于Meta分析的放牧压力对内蒙古高原草地生态系统的影响[J]. 中国生态农业学报, 2020, 28(12): 1847-1858. [Zhan Tianyu, Sun Jian, Zhang Zhenchao, et al. Effects of grazing on temperate grassland ecosystem based on a Meta-analysis[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(12): 1847-1858.]

[15] 许庆民, 王云英, 辛莹, 等. Meta分析放牧对中国北方草地生态系统蒸散量的影响[J]. 草业科学, 2020, 37(10): 1952-1958. [Xu Qingmin, Wang Yunying, Xin Ying, et al. Meta-analysis of the effect of grazing on grassland evapotranspiration in China[J]. Prataculturral Science, 2020, 37(10): 1952-1958.]

[16] 颉茂华, 孙佳文, 刘铁鑫. 中国资源型城市生态系统服务价值评价——基于Meta模型视角[J]. 干旱区地理, 2022, 45(6): 1949-1957. [Xie Maohua, Sun Jiawen, Liu Tiexin. Evaluation of ecosystem service value of resource-based cities in China: Based on the perspective of Meta model[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(6): 1949-1957.]

[17] 阮芳芳, 刘纪新, 陈芷薇, 等. 不同臭氧度量指标对我国人群总死亡影响的Meta分析[J]. 环境科学, 2022, 43(1): 37-45. [Ruan Fangfang, Liu Jixin, Chen Zhiwei, et al. Meta-analysis of the impact of different ozone metrics on total mortality in China[J]. Environmental Science, 2022, 43(1): 37-45.]

[18] 张健琳. 基于Meta分析的西南矿区土壤重金属污染特征及风险评价[D]. 武汉: 湖北大学, 2021. [Zhang Jianlin. Pollution characteristics and risk assessment of soil heavy metals in mine areas in southwest China based on Meta analysis[D]. Wuhan: Hubei University, 2021.]

[19] Li Y R, Cao Z, Long H L, et al. Dynamic analysis of ecological environment combined with land cover and NDVI changes and implications for sustainable urban-rural development: The case of Mu Us Sandy Land, China[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 142(2): 697-715.

[20] 欧阳志云. 生态建设与可持续发展[M]. 北京: 科学出版社, 2007. [Ouyang Zhiyun. Ecological construction and sustainable development in China[M]. Beijing: Science Press, 2007.]

[21] Liu J G, Li S X, Ouyang Z Y, et al. Ecological and socioeconomic effects of China's policies for ecosystem services[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2008, 105(28): 9477-9482.

[22] 朱震达. 三十年来中国沙漠研究的进展[J]. 地理学报, 1979, 34(4): 305-314. [Zhu Zhenda. Thirty years in research works on Chinese sandy deserts[J]. Acta Geographica Sinica, 1979, 34(4): 305-314.]

[23] 吴波, 慈龙骏. 毛乌素沙地荒漠化的发展阶段和成因[J]. 科学通报, 1998, 43(22): 2437-2440, 91. [Wu Bo, Ci Longjun. The development stages and causes of desertification in Mu Us Sandy Land [J]. Chinese Science Bulletin, 1998, 43(22): 2437-2440, 91.]

[24] 陈黔. 基于Google Earth Engine的中国北方四大沙地灌木覆盖度估算[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2019. [Chen Qian. The estimation of shrub coverage based on Google Earth Engine in four mega-sandy lands in northern China[D]. Guiyang: Guizhou Normal University, 2019.]

[25] Moher D, Liberati A, Tetzlaff J, et al. Preferred reporting items for systematic reviews and Meta-analyses: The PRISMA statement[J]. Journal of Clinical Epidemiology, 2009, 62(10): 1006-1012.

[26] 吴薇. 沙漠化遥感动态监测的方法与实践[J]. 遥感技术与应用, 1997, 12(4): 15-21. [Wu Wei. Method and practice of remote sensing monitoring on desertification development[J]. Remote Sensing Technology and Application, 1997, 12(4): 15-21.]

[27] Feng K, Wang T, Liu S L, et al. Path analysis model to identify and analyze the causes of aeolian desertification in Mu Us Sandy Land, China[J]. Ecological Indicators, 2021, 124: 107386, doi: 10.1016/j.ecolind.2021.107386.

[28] 刘娟. 内蒙古毛乌素沙地景观格局动态变化及其驱动力研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2016. [Liu Juan. Dynamics and driving forces of landscape in Mu Us Sandy Land in Inner Mongolia [D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2016.]

[29] 李晓松. 基于混合象元分解的荒漠化监测与评价[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2005. [Li Xiaosong. Desertification monitoring and evaluation based on spectral mixture analysis[D]. Harbin:

Northeast Forestry University, 2005.]

[30] 赵媛媛, 丁国栋, 高广磊, 等. 毛乌素沙区沙漠化土地防治区划[J]. 中国沙漠, 2017, 37(4): 635-643. [Zhao Yuanyuan, Ding Guodong, Gao Guanglei, et al. Regionalization for aeolian desertification control in the Mu Us Sandy Land region, China[J]. Journal of Desert Research, 2017, 37(4): 635-643.]

[31] 吴波. 毛乌素沙地的景观动态与荒漠化成因研究[D]. 北京: 中国科学院地理科学与资源研究所, 1997. [Wu Bo. Research on the landscape dynamics and desertification origination of Mu Us Sandland[D]. Beijing: Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, 1997.]

[32] 王涛, 吴薇, 王熙章. 沙质荒漠化的遥感监测与评估——以中国北方沙质荒漠化区内的实践为例[J]. 第四纪研究, 1998(2): 3-5. [Wang Tao, Wu Wei, Wang Xizhang. Remote sensing monitoring and assessing sandy desertification: An example from the sandy desertification region of northern China[J]. Quaternary Sciences, 1998(2): 3-5.]

[33] 吴波. 沙质荒漠化土地景观分类与制图——以毛乌素沙地为例[J]. 植物生态学报, 2000, 24(1): 52-57. [Wu Bo. Landscape classification and cartography of sandy desertified land: A case study in the Mu Us Sandy Land[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2000, 24(1): 52-57.]

[34] 柏菊, 闫峰. 2001年—2012年毛乌素沙地荒漠化过程及驱动力研究[J]. 南京师大学报(自然科学版), 2016, 39(1): 132-138. [Bai Ju, Yan Feng. Process of desertification and its driving forces in the Mu Us Sandy Land in 2001—2012[J]. Journal of Nanjing Normal University (Natural Science Edition), 2016, 39(1): 132-138.]

[35] 郭坚, 王涛, 薛娴, 等. 毛乌素沙地荒漠化现状及分布特征[J]. 水土保持研究, 2006, 13(3): 198-199. [Guo Jian, Wang Tao, Xue Xian, et al. The status and distribution of desertification in Maowusu Sandy Land[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2006, 13(3): 198-199.]

[36] 李晓松, 吴波, 范文义, 等. 基于光谱混合分析的荒漠化信息提取——以毛乌素沙地为例[J]. 林业科学研究, 2006, 19(2): 192-198. [Li Xiaosong, Wu Bo, Fan Wenyi, et al. Extraction of desertification information based on SMA: A case study in Mu Us Sandland[J]. Forest Research, 2006, 19(2): 192-198.]

[37] 成军锋, 贾宝全, 赵秀海, 等. 干旱半干旱地区植被覆盖度的动态变化分析——以毛乌素沙漠南部为例[J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(12): 172-176. [Cheng Junfeng, Jia Baoquan, Zhao Xiuhai, et al. Dynamic change of desertification in semi-arid and arid environment[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2009, 23(12): 172-176.]

[38] 韩雪莹, 杨光, 秦富仓, 等. 毛乌素沙地近30年沙漠化土地时空动态演变格局[J]. 水土保持研究, 2019, 26(5): 144-150. [Han Xueying, Yang Guang, Qin Fucang, et al. Spatial and temporal dynamic patterns of sandy land in Mu Us in the last 30 years[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(5): 144-150.]

[39] 保家有, 李晓松, 吴波. 基于沙地植被指数的荒漠化评价方法[J]. 东北林业大学学报, 2008, 36(1): 69-72. [Bao Jiayou, Li Xiaosong, Wu Bo. Desertification evaluation based on sand vegetation index[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2008, 36(1): 69-72.]

[40] 郝成元. 毛乌素地区沙漠化驱动机制研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2003. [Hao Chengyuan. Studies on desertization driving forces mechanism in Mu Us region[D]. Jinan: Shandong Normal University, 2003.]

[41] 贾光普, 左合君, 韩雪莹, 等. 毛乌素沙地沙化土地时空动态研究[J]. 北方园艺, 2019(21): 79-88. [Jia Guangpu, Zuo Hejun, Han Xueying, et al. Temporal and spatial dynamics of desertified land in Mu Us Sandy Land[J]. Northern Horticulture, 2019(21): 79-88.]

[42] 郭紫晨, 刘树林, 康文平, 等. 2000—2015年毛乌素沙区植被覆盖度变化趋势[J]. 中国沙漠, 2018, 38(5): 1099-1107. [Guo Zichen, Liu Shulin, Kang Wenping, et al. Change trend of vegetation coverage in the Mu Us sandy region from 2000 to 2015[J]. Journal of Desert Research, 2018, 38(5): 1099-1107.]

[43] 李超. 基于差值指数的毛乌素沙地荒漠化监测分析[D]. 南昌: 东华理工大学, 2019. [Li Chao. Monitoring and analysising of desertification in Mu Us Sandy Land based on differential index[D]. Nanchang: East China University of Technology, 2019.]

[44] 韩雪莹. 近30年毛乌素沙地沙漠化土地时空动态变化及其自相关研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2019. [Han Xueying. Spatial and temporal dynamics and spatial autocorrelation of desertification land in Mu Us Sandy Land in recent 30 years[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2019.]

[45] 任兰英. 毛乌素沙地荒漠化景观演变特征研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2014. [Ren Lanying. Research on landscape evolution characteristics of desertification in Maowusu Sandy Land [D]. Hohhot: Inner Mongolia Normal University, 2014.]

[46] 杨思全, 王薇. 毛乌素沙地土地沙漠化评价[J]. 干旱区地理, 2010, 33(2): 258-262. [Yang Siquan, Wang Wei. Evaluation of desertification in Mu Us Sandy Land[J]. Arid Land Geography, 2010, 33(2): 258-262.]

[47] 王玉华, 杨景荣, 丁勇, 等. 近年来毛乌素沙地土地覆被变化特征[J]. 水土保持通报, 2008, 28(6): 53-57. [Wang Yuhua, Yang Jingrong, Ding Yong, et al. Characteristics of land cover change in Mu Us Desert in recent years[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2008, 28(6): 53-57.]

[48] 刘广峰, 吴波, 范文义, 等. 基于像元二分模型的沙漠化地区植被覆盖度提取——以毛乌素沙地为例[J]. 水土保持研究, 2007, 14(2): 268-271. [Liu Guangfeng, Wu Bo, Fan Wenyi, et al. Extraction of vegetation coverage in desertification regions based on the dimidiate pixel model: A case study in Maowusu Sandland [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2007, 14(2): 268-271.]

[49] 郝成元, 吴绍洪, 杨勤业. 毛乌素地区沙漠化与土地利用研究[J]. 中国沙漠, 2005, 25(1): 35-41. [Hao Chengyuan, Wu Shao-

hong, Yang Qinye. Research on relationship between sandy desertification and land-use in Mu Us region[J]. Journal of Desert Research, 2005, 25(1): 35-41.]

[50] 吴薇, 王熙章, 姚发芬. 毛乌素沙地沙漠化的遥感监测[J]. 中国沙漠, 1997, 17(4): 83-88. [Wu Wei, Wang Xizhang, Yao Fafen. Appling remote sensing data for desertification monitoring in the Mu Us Sandy Land[J]. Journal of Desert Research, 1997, 17(4): 83-88.]

[51] 房世波, 许端阳, 张新时. 毛乌素沙地沙漠化过程及其气候因子驱动分析[J]. 中国沙漠, 2009, 29(5): 796-801. [Fang Shibo, Xu Duanyang, Zhang Xinshi. Desertification process and its driving meteorological factors in Mu Us Sandland[J]. Journal of Desert Research, 2009, 29(5): 796-801.]

[52] Han X Y, Jia G P, Yang G, et al. Spatiotemporal dynamic evolution and driving factors of desertification in the Mu Us Sandy Land in 30 years[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 21734, doi: 10.1038/s41598-020-78665-9.

[53] Liu Q F, Zhang Q, Yan Y Z, et al. Ecological restoration is the dominant driver of the recent reversal of desertification in the Mu Us Desert (China)[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 268: 122241, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.122241.

[54] Yu X W, Zhuo Y, Liu H M, et al. Degree of desertification based on normalized landscape index of sandy lands in Inner Mongolia, China[J]. Global Ecology and Conservation, 2020, 23: e1132, doi: 10.1016/j.gecco.2020.e01132.

[55] Yan F, Wu B, Wang Y J. Estimating aboveground biomass in Mu Us Sandy Land using Landsat spectral derived vegetation indices over the past 30 years[J]. Journal of Arid Land, 2013, 5(4): 521-530.

[56] Zhang Y Z, Chen Z Y, Zhu B Q, et al. Land desertification monitoring and assessment in Yulin of northwest China using remote sensing and geographic information systems (GIS)[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2008, 147: 327-337.

[57] Zhang L, Yue L P, Xia B. The study of land desertification in transitional zones between the Mu Us Desert and the Loess Plateau using RS and GIS: A case study of the Yulin region[J]. Environmental Geology, 2003, 44(5): 530-534.

[58] 吴薇. 近50年来毛乌素沙地的沙漠化过程研究[J]. 中国沙漠, 2001, 21(2): 164-169. [Wu Wei. Study on process of desertification in Mu Us Sandy Land for last 50 years, China[J]. Journal of Desert Research, 2001, 21(2): 164-169.]

[59] 王涛, 吴薇, 薛娴, 等. 中国北方沙漠化土地时空演变分析[J]. 中国沙漠, 2003, 23(3): 24-29. [Wang Tao, Wu Wei, Xue Xian, et al. Time-space evolution of desertification land in northern China [J]. Journal of Desert Research, 2003, 23(3): 24-29.]

[60] 王涛, 吴薇, 薛娴, 等. 近50年来中国北方沙漠化土地的时空变化[J]. 地理学报, 2004, 59(2): 203-212. [Wang Tao, Wu Wei, Xue Xian, et al. Spatial-temporal changes of sandy desertified land during last 5 decades in northern China[J]. Acta Geographica Sinica, 2004, 59(2): 203-212.]

[61] 刘广峰. 毛乌素沙地荒漠化监测及定居放牧影响的研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2007. [Liu Guangfeng. A study on desertification monitoring and the impact of settle grazing in Mu Us Sandland[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2007.]

[62] 郭强. 中国北方荒漠化遥感动态监测与定量评估研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院遥感与数字地球研究所), 2018. [Guo Qiang. Monitoring and assessment of desertification from remote sensing in the northern China[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Science (Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Science), 2018.]

[63] Guo Q, Fu B H, Shi P L, et al. Satellite monitoring the spatial-temporal dynamics of desertification in response to climate change and human activities across the Ordos Plateau, China[J]. Remote Sensing, 2017, 9: 525, doi: 10.3390/rs9060525.

[64] 国家林业局. 全国荒漠化和沙化监测技术规定[M]. 北京: 中国林业出版社, 2013. [State Forestry Administration. National desertification and sandification monitoring technical regulations[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2013.]

[65] 殷贺, 李正国, 王仰麟. 荒漠化评价研究进展[J]. 植物生态学报, 2011, 35(3): 345-352. [Yin He, Li Zhengguo, Wang Yanglin. A review on the research progress of desertification assessment[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2011, 35(3): 345-352.]

[66] 邬亚娟, 刘廷玺, 童新, 等. 基于长时间序列landsat数据的科尔沁沙地土地利用演变分析[J]. 生态学报, 2020, 40(23): 8672-8682. [Wu Yajuan, Liu Tingxi, Tong Xin, et al. Dynamic evolution analysis of land use (land cover) in Horqin Sandy Land based on long time deries landsat data[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40 (23): 8672-8682.]

[67] 高志海. 基于RS和GIS的绿洲植被与荒漠化动态研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2003. [Gao Zhihai. Study on dynamic change of vegetation and desertification in oasis based upon RS and GIS technique[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2003.]

[68] 柳江, 彭少麟. 生态学与医学中的整合分析(Meta-analysis)[J]. 生态学报, 2004, 24(11): 2627-2634. [Liu Jiang, Peng Shaolin. Meta-analysis in ecology and medical science[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(11): 2627-2634.]

[69] 晏娇. 毛乌素沙地近25年荒漠化研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2023. [Yan Jiao. Study on desertification of Mu Us Sandy Land in recent 25 years[D]. Fuxing: Liaoning Technical University, 2023.]

[70] Feng K, Wang T, Liu S L, et al. Monitoring desertification using machine-learning techniques with multiple indicators derived from MODIS images in Mu Us Sandy Land, China[J]. Remote Sensing, 2022, 14(11): 2663, doi: 10.3390/rs14112663.

[71] 刘玉平. 毛乌素沙区草场荒漠化评价的指标体系及荒漠化驱动力研究[D]. 北京: 中国科学院地理科学与资源研究所, 1997. [Liu Yuping. Studies on indicator system of rangeland desertification assessment and driving force of desertification in Mu Us Des-

ert[D]. Beijing: Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, 1997.]
[72] 葛根高娃, 乌云巴图. 内蒙古牧区生态移民的概念、问题与对策[J]. 内蒙古社会科学, 2003, 24(2): 118-122. [Gegen Gaowa, Wuyun Batu. Concepts, problems, and countermeasures of ecology emigration in Inner Mongolia pastoral area[J]. Inner Mongolia Social Sciences, 2003, 24(2): 118-122.]
[73] 薛华柱, 袁茜, 董国涛, 等. 基于基线遥感生态指数的鄂尔多斯市生态质量分析[J]. 干旱区地理, 2024, 47(2): 248-259. [Xue Huazhu, Yuan Qian, Dong Guotao, et al. Ecological quality analysis of Ordos City based on the baseline remote sensing ecological index[J]. Arid Land Geography, 2024, 47(2): 248-259.]

A Meta-analysis of desertification dynamics in the Mu Us Sandy Land

XIU Xiaomin[1,2], WU Bo[1,2,3], FEI Bingqiang[1,2], YIN Jie[1,2], ZHANG Lingguang[1,2], LI Jia[1,2], PANG Yingjun[1,2], JIA Xiaohong[1,2]

(1. Institute of Ecological Conservation and Restoration, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. Key Laboratory of State Forestry and Grassland Administration on Desert Ecosystem and Global Change, Beijing 100091, China; 3. Institute of Great Green Wall, Beijing 100091, China)

Abstract: Desertification is a critical global ecological and environmental challenge. The Mu Us Sandy Land is a pivotal region for desertification control in China. Over the past three decades, numerous studies have examined desertification dynamics in this area; however, a systematic analysis of these dynamics over the past 70 years has been lacking. This study conducted a Meta-analysis of desertification dynamics by integrating the findings of 39 case studies on the Mu Us Sandy Land since the 1950s and discussed the factors influencing desertification. The results indicate the following: (1) Over the past 70 years, the proportion of light desertification areas initially decreased and then increased, the proportion of moderate desertification areas exhibited a slight increasing trend, and the proportion of severely desertified areas first increased and then decreased, reflecting a notable reversal of desertification trends in the Mu Us Sandy Land. (2) A slight reversal trend of desertification was observed from 1980 to 1989, desertification expanded from 1990 to 1999, the expansion trend was reversed from 2000 to 2009, and desertification continued to steadily reverse from 2010 to 2019. The year 2000 marked a significant turning point in the reversal of desertification in the Mu Us Sandy Land. (3) Continuous drought has significantly promoted desertification expansion. The sustained reversal of desertification since 2000 is attributed to extensive ecological engineering efforts and the implementation of policies such as “prohibition against grazing, closed grazing, rotational grazing, and limiting grazing animal numbers based on pasture availability”. These findings provide valuable insights for understanding the development patterns of desertification in the Mu Us Sandy Land and formulating effective desertification control strategies.

Key words: desertification dynamics; Meta-analysis; driver factors; ecological project; Mu Us Sandy Land